

УДК 623.4.011

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.1\(21\).67-74](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.1(21).67-74)**П.П. ЧАБАНЕНКО,***доктор воєнних наук, професор***С.М. РОЗГОНАЄВ,** *кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник***О.М. БЕРЕЖНИЙ,** *кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник**(Центральний науково-дослідний інститут  
озброєння та військової техніки  
Збройних Сил України, м. Київ)*

## Поцінювання ефективності експлуатації та бойового застосування озброєння і військової техніки з перервними контурами управління за показником безпомилковості виконання задачі

*Розроблені метод та методика оцінки ефективності виконання задачі для випадку перервного процесу експлуатації та бойового застосування озброєння і військової техніки на основі ергомережних графо-аналітичних моделей. Розрахунками (на моделі) показано вплив зворотного зв'язку на ймовірність безпомилкового виконання задачі для процесу, що досліджувався.*

*Разработанные метод и методика оценки эффективности выполнения задачи для случая прерывного процесса эксплуатации и боевого применения вооружения и военной техники на основании эргомережных графо-аналитических моделей. Расчетами (на модели) показано влияние обратной связи на вероятность безошибочного выполнения задачи для исследуемого процесса.*

Один із базових принципів ефективного управління в кібернетиці та військовій справі – принцип *зворотного зв'язку* (ЗЗв). За ЗЗв управляюча інформація перетворюється в інформацію стану та зворотно, циркулюючи по контуру керування. Методи та моделі кількісного врахування впливу ЗЗв на якість *безперервних* процесів керування широко використовується та удосконалюється [1]. Природа процесів експлуатації та бойового застосування озброєння і військової техніки – *перервна*. До них, наприклад, відносяться:

- підготовка боєкомплекту протикорабельних ракет до видачі на носій;
- розробка штабом Плану вогневого ураження противника;
- ракетна стрільба з метою ураження головної цілі в корабельній групі противника та інші, що здійснюються в військових організаційно-технічних системах (ОТС).

Дослідники військових ОТС мають потребу у продуктивних методах та моделях кількісного оцінювання впливу ЗЗв на ефективність *перервних* процесів функціонування (ПФ) у вигляді *взаємопов'язаних дій* (розумових та/або фізичних), *безпомилкове і своєчасне виконання яких ергомічними та технічними елементами системи призводить до досягнення її мети*.

Подібні ПФ і математичні моделі по оцінюванню ймовірнісних характеристик їх типових фрагментів розглядалися в роботах [2-5], але тільки в класі наближених показників якості виконання і при детермінованій початковій умові «норма». Актуальність розвитку функціонально-структурного підходу для дослідження перервних ПФ систем підтверджується в [6,7], де він застосований до діалогових систем комп'ютерного навчання, але без врахування змін станів об'єкта управління (ОУ).

**Метою статті** є представлення метода та методики графоаналітичного моделювання типових контурів функціонування ОТС з оцінкою безпомилковості виконання задачі.

### **Вихідні положення.**

В ПФ військових ОТС інформація циркулює у вигляді наказів, розпоряджень, команд, доповідей та повідомлень. Рішення виробляються та виконуються у вигляді цілеспрямованих циклічних впливів [8] на ОУ. До основних допущень віднесемо:

- стан ОУ (системи в цілому) представляється дискретно, в частковому випадку подвійно: 1 – правильний, 2 – помилковий;
- існує можливість встановити відповідність результатів рішень та їх виконання мети системи через співвідношення їй за-рівневих завдань, функцій та обмежень, визначених умов;
- поняття *похибка* включає поняття *збій* і полягає у невідповідності рішення фактичному стану системи та її мети або такого результату його виконання, яке не відповідає наміченому рішенню.

Конттури функціонування в ОТС можуть бути різними. Виділимо із типових такий контур безпомилковості, в якому здійснюються контрольовані за правильністю

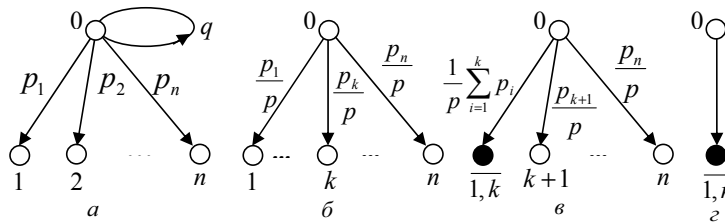


Рис. 1.

виконання дії та можливе відновлення правильного функціонування системи з усуненням наслідків похибок, що допущені. Функція **контролю** має загальне значення. В концепції **Internet of Things (“Інтернет речей”)** контроль передбачається тотальним [9], що підтверджує його загальність та важливість. В контурі безпомилковості ОТС контроль – типовий елемент процесу її функціонування, що приймає рішення.

Графоаналітичний метод, що пропонується, призначений для виведення формул з оцінювання показника безпомилковості рішення задач ОТС з контурами безпомилковості в ПФ. В таких контурах виявляються похибки управління та виконання, усуваються їх наслідки, затрачується деякий ресурс.

Виведення відміченого показника здійснюється розробкою тріади модельних елементів:

- графу дій-робіт (ГР) як зручний для сприйняття структурно-логічної схеми процесу у формалізованому вигляді, але без деталізації;
- перелік вихідних даних (ВД): ймовірнісні характеристики виконання дій (робіт, операцій, заходів, задач);
- графу подій (ГП) – детальної моделі ПФ, співвіднесеної ГР та ВД, але що відображає процес на рівні вихідних даних.

Розробка формул для показників зводиться до спільного укрупнення ГП та еквівалентному перетворенню характеристик його дуг за етапами, рівнями аж до отримання підсумкових формул. Після чого необхідність в ГП відпадає.

**1. Модель простого циклічного процесу**

Проста граф-модель циклічного процесу представлена на рис. 1а у вигляді графу подій з петлею при вершині 0 з n можливими виходами. Ймовірність того, що на деякому кроці l об’єкт (або система в цілому), що моделюється, буде знаходитися в вершині – стані 0, у випадку незалежних кроків дорівнює  $q^l$ . Ймовірність завершення процесу з результатом i буде

$$P_i = \sum_{l=1}^{\infty} p_i q^{l-1} = \frac{p_i}{1-q} = \frac{p_i}{p}, \tag{1}$$

де p – однокрокова ймовірність завершення процесу з будь-яким результатом – виходом  $i = 1, n$  із циклічності ( $p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$ ).

Аналітичному перетворенню (1) співвідноситься перетворення графа в ймовірнісне розгалуження (рис. 1б) без петлі, але з еквівалентними характеристиками  $p_i / p$  дуг з вершини 0.

При об’єднанні вершин 1, 2, ..., k граф представляється рис. 1в з ймовірністю  $(p_1 + p_2 + \dots + p_k) / p$  дуги

в об’єднану вершину  $\overline{1, k}$ . При  $k = n$  увесь процес зводиться до одиничної дуги (рис. 1г), що відображає здійсненість нормувальної умови при розглянутих перетвореннях. Доповнимо їх очевидною заміною шляху із n послідовних дуг однією дугою з ймовірністю, що дорівнює помноженню  $p_1 p_2 \dots p_n$  ймовірностей всіх дуг шляху.

Замітимо, що при складанні однокрокових ймовірностей  $p_i$  у графі рис. 1а отримаємо частковий випадок графу (рис. 2), якому відповідає **геометричний** розподіл числа кроків до завершення процесу

$$p(p, l) = pq^{l-1}, \tag{2}$$

де  $p = p_1 + \dots + p_n$ .

Геометричний розподіл – єдиний із дискретних розподілів, що не має пам’яті: зміщення по вісі l його не змінює. Це означає, що дослідний процес без післядії: з будь-якого l він представляється як з початку та не залежить від його протікання в минулому.

Моментні характеристики числа кроків, що підлягають розподілу (2):

$$\left. \begin{array}{l} \text{– математичне очікування} \quad m_l = 1/p \\ \text{– дисперсія} \quad d_l = q/p^2 \end{array} \right\} \tag{3}$$

При цьому середнє число кроків до виходу із процесу буде

$$\bar{l} = m_l - 1 = q/p.$$

**2. Граф-модель контуру безпомилковості**

В якості контуру безпомилковості ПФ системи розглянемо типову циклічну структуру функцій у вигляді графа робіт, що приведена на рис. 3.

Задамо вихідні дані матрицями ймовірностей  $S_i$  початкових станів i ОУ та матрицями умовних ймовірностей його станів j при виконанні відповідних дій P, K, B в умовах i:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P^{11} & P^{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K^{11} & K^{12} \\ K^{21} & K^{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ B^{21} & B^{22} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

де  $P^{21}$  (штатна робоча операція не відновлює стан правильного функціонування ОУ, системи),  $B^{12} = 0$  (операцією відновлення стан не погіршується).

**3. Виведення формул для оцінки показника безпомилковості рішення задач**

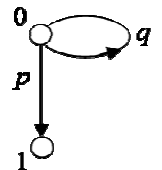


Рис. 2.

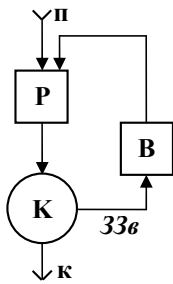


Рис. 3.

**Р** – робоча функція (розумова або фізична дія; розробка плану, його виконання; захід; операція; робота),  
**К** – контроль правильності виконання операції Р,  
**В** – відновлення правильного функціонування (усунення наслідків похибок з відновленням стану ОУ, системи),  
**п/к** – початок/кінець процесу або його фрагменту (роз'єми),  
**33в** – зворотний зв'язок.

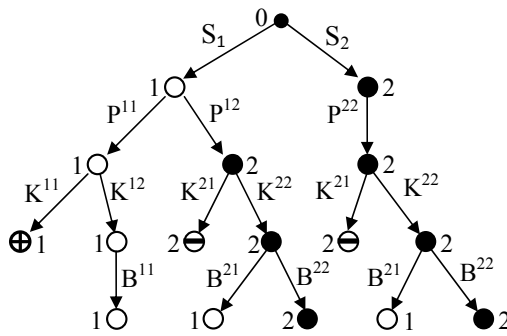


Рис. 4.

Вершини:

- початкова ●
- поглинаючі ⊕ ⊖
- проміжні і висячі ○ ●

Для виведення аналітичних залежностей з оцінки показника безпомилковості виконання задач по структурі рис. 3 представимо процес деталізованим ГП (рис. 4).

На дугах графу вказані ймовірнісні характеристики елементів Р,К,В графу робіт із складу вихідних даних (4).

Замикаючи вершини, що висяють, на відповідні проміжні вершини отримаємо рис. 5 з еквівалентними характеристиками (5)

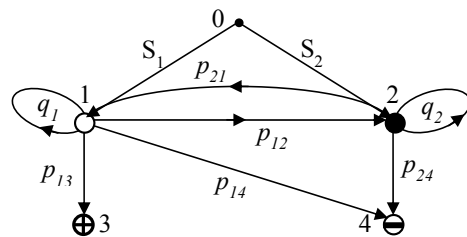


Рис. 5.

$$\left. \begin{aligned} p_{12} &= P^{12} K^{22} B^{22}, & p_{14} &= P^{12} K^{21} \\ p_{21} &= P^{22} K^{22} B^{21}, & p_{24} &= P^{22} K^{21} \\ p_{13} &= P^{11} K^{11}, & q_2 &= P^{22} K^{22} B^{22} \\ q_1 &= P^{11} K^{12} B^{11} + P^{12} K^{22} B^{21} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де  $P^{22} = B^{11} = 1, \quad q_i = 1 - p_i.$

Виключимо із ГП рис. 5 переходи у поглинаючі вершини (виходи із процесу) та розглянемо його циклічну складову рис. 6а з покроковим представленням рис. 6б.

Складемо систему рекурентних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} S_1(l) &= S_1(l-1)q_1 + S_2(l-1)p_{21} \\ S_2(l) &= S_2(l-1)q_2 + S_1(l-1)p_{12} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

при  $S_1(0) = S_1, \quad S_2(0) = S_2 = 1 - S_1.$

Чисельно можливо визначити ймовірності безпомилкового (+) та помилкового (-) результатів на довільному кроці процесу

$$\left. \begin{aligned} P^+(l) &= S_1(l-1)p_{13} \\ P^-(l) &= S_1(l-1)p_{14} + S_2(l-1)p_{24} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де  $p_{13}, p_{14}, p_{24}$  наведені в (5).

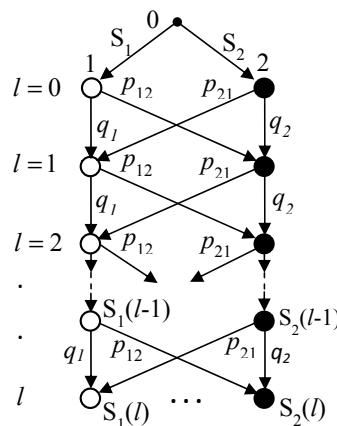
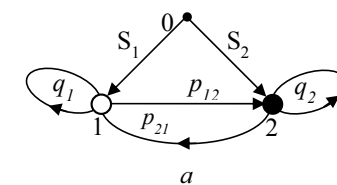


Рис. 6.

Ймовірність безпомилкового рішення задачі за структурою рис. 3 складає

$$P_b = \sum_{l=1}^{\infty} P^+(l) = P^{11} K^{11} \sum_{l=1}^{\infty} S_1(l-1). \quad (8)$$

У випадку обмеження процесу за числом кроків  $L \leq l_0$  складання в (8) здійснюється до  $l_0$  включно.

Відомий недолік рекурентного чисельного розрахунку – великі витрати ресурсу часу та пам’яті, ускладненість виявлення закономірностей. Тому розглянемо і виведення аналітичних залежностей для  $S_i(l)$ . При цьому основними прийомами будуть: виявлення типових шляхів в початковому графі і звернення до індукції для узагальнення функцій  $S_i(l)$ .

Структурний аналіз рис. 6 виділяє типовий шлях із стану 1 в стан 1 за  $l$  кроків (рис. 7). На ньому можливі  $x$  кроків при вершині 1, ще  $2r$  кроків з переходом в вершину 2 та назад, плюс  $z$  кроків при вершині 2. Всього  $x+2r+z=l$  кроків. Один шлях без зміни стану з ймовірністю  $q_1^x$ . Решта проходять через обидві вершини, кожен містить у ймовірності співмножник  $q_1^x q_2^z$  та однаковий у всіх співмножник  $(p_{12} p_{21})^r$ . Подібний розглянуто-му типовий шлях із стану 2 в стан 1.

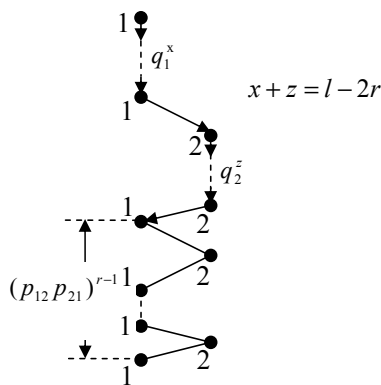


Рис. 7. Типовий шлях з

Встановимо числа типових шляхів, що ведуть в стан 1, та визначимо ймовірності  $S_i(l)$ .

Розкриваючи  $S_i(l)$  послідовно по  $l$ , запишемо:

$$\begin{aligned} l=1 & S_1 q_1 + S_2 p_{21}, \\ l=2 & S_1 (q_1^2 + p_{12} p_{21}) + S_2 p_{21} (q_1 + q_2), \\ l=3 & S_1 [q_1^3 + p_{12} p_{21} (q_2 + 2q_1)] + S_2 p_{21} (q_1^2 + q_1 q_2 + q_2^2 + p_{12} p_{21}), \\ l=4 & S_1 [q_1^4 + p_{12} p_{21} (q_2^2 + 2q_2 q_1 + 3q_1^2)] + (p_{12} p_{21})^2 + S_2 p_{21} [q_1^3 + q_1^2 q_2 + q_1 q_2^2 + q_2^3 + p_{12} p_{21} (2q_1 + 2q_2)], \\ & \dots \\ l=7 & S_1 [q_1^7 + p_{12} p_{21} \sum_{k=1}^6 k q_1^{k-1} q_2^{6-k} + (p_{12} p_{21})^2 (4q_2^3 + 9q_2^2 q_1 + 12q_2 q_1^2 + 10q_1^3)] + (p_{12} p_{21})^3 \times \\ & \times (3q_2 + 4q_1)] + S_2 p_{21} [\sum_{k=1}^7 q_1^{7-k} q_2^{k-1} + p_{12} p_{21} (5q_1^4 + 8q_2 q_1^3 + 9q_2^2 q_1^2 + 8q_2^3 q_1 + 5q_2^4)] + \\ & + (p_{12} p_{21})^2 (6q_1^2 + 9q_1 q_2 + 6q_2^2) + (p_{12} p_{21})^3]. \end{aligned}$$

$S_2(l)$  визначається шляхом простої заміни індексів ( $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 1$ ):

$$\begin{aligned} l=1 & S_1 q_1 + S_2 p_{21}, \\ l=2 & S_1 (q_1^2 + p_{12} p_{21}) + S_2 p_{21} (q_1 + q_2), \\ l=3 & S_1 [q_1^3 + p_{12} p_{21} (q_2 + 2q_1)] + S_2 p_{21} (q_1^2 + q_1 q_2 + q_2^2 + p_{12} p_{21}), \end{aligned}$$

і т.п.

Виявляється, що при  $r = const$  числа перемножень  $q_1^x q_2^z$  дорівнюють перемноженням чисел поєднань:

$$C_{r+k-1}^r C_{l-r-k}^{r-1} \text{ при } S_1; \quad C_{r+k-1}^r C_{l-r-k}^r \text{ при } S_2.$$

В результаті по індукції отримаємо формули для обчислення ймовірностей стану ОУ на довільному кроці  $l$  процесу:

$$\begin{aligned} S_1(l) = & S_1 [q_1^l + \sum_{r=1}^{r_1} (p_{12} p_{21})^r \sum_{k=1}^{l-2r+1} C_{r+k-1}^r C_{l-r-k}^{r-1} q_1^{k-1} q_2^{l-2r+1-k}] + \\ & + S_2 p_{21} \sum_{r=0}^{r_2} (p_{12} p_{21})^r \sum_{k=1}^{l-2r} C_{r+k-1}^r C_{l-r-k}^r q_1^{l-2r-2} q_2^{k-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $l=1,2,3,\dots$ , а межі підсумовування:

$$\left. \begin{aligned} r_1 = r_2 = (l-1)/2 & \text{ при парних } l = 2,4,6,\dots \\ r_1 = l/2, r_2 = r_1 - 1 & \text{ при непарних } l = 1,3,5,\dots \end{aligned} \right\}$$

а так як граф рис. 6б симетричний, то  $S_2(l)$  записується по (9) заміною індексів:  $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 1$ .

Перевірка на часткових випадках підтверджує правильність формули (9). Зокрема для  $l=4$  маємо

$$\begin{aligned} S_1(4) = & S_1 [q_1^4 + p_{12} p_{21} \sum_{k=1}^2 C_k^1 C_{3-k}^0 q_1^{k-1} q_2^{3-k} + (p_{12} p_{21})^2] + \\ & + S_2 p_{21} (\sum_{k=1}^4 q_1^{4-k} q_2^{k-1} + p_{12} p_{21} \sum_{k=1}^2 C_k^1 C_{3-k}^1 q_1^{2-k} q_2^{k-1}) = \\ & S_1 [q_1^4 + p_{12} p_{21} (q_2^2 + 2q_2 q_1 + 3q_1^2) + (p_{12} p_{21})^2] + S_2 p_{21} [q_1^3 + q_1^2 q_2 + q_1 q_2^2 + q_2^3 + \\ & + 2p_{12} p_{21} (q_1 + q_2)], \end{aligned}$$

що співпадає з результатом безпосередніх перетворень по рекурсії (6).

Відмітимо, що вираз (9) громіздкий, що свідчить про необхідність пошуку більш простих рішень.

#### 4. Розробка граничних виразів для показників безпомилковості

Звернемося до рис. 6а та перетворимо цей граф за правилом граничного врахування циклічності: *прибирання петлі при вершині еквівалентно поділу ймовірностей кожної із її дуг, що виходять, на їх суму*. Отримаємо граф рис. 8а, який можливо представити у вигляді рис. 8б.

Представимо рис. 8б в покроковому вигляді (рис. 9) з записом формул для ймовірностей станів по крокам  $l=1,2,3,\dots$  з послідовним узагальненням по довільному кроці по індукції. В результаті отримаємо для ймовірності стану 1 на кроці  $l$ :

$$S_1(l) = \begin{cases} S_1 a_1^{l/2} b_2^{l/2} & \text{при } l = 2,4,\dots \\ S_2 a_1^{(l-1)/2} b_2^{(l+1)/2} & \text{при } l = 1,3,\dots \end{cases} \quad (10)$$

А так як граф рис. 9 симетричний, то можемо записати

$$S_1(l) = \begin{cases} S_1 a_1^{l/2} b_2^{l/2} & \text{при } l = 2,4,\dots \\ S_2 a_1^{(l-1)/2} b_2^{(l+1)/2} & \text{при } l = 1,3,\dots \end{cases}$$

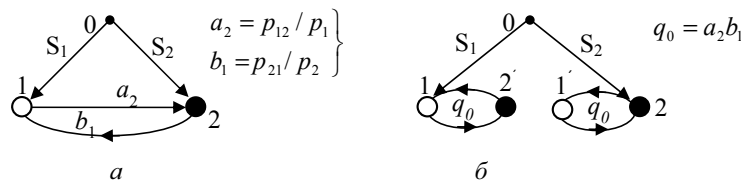


Рис. 8.

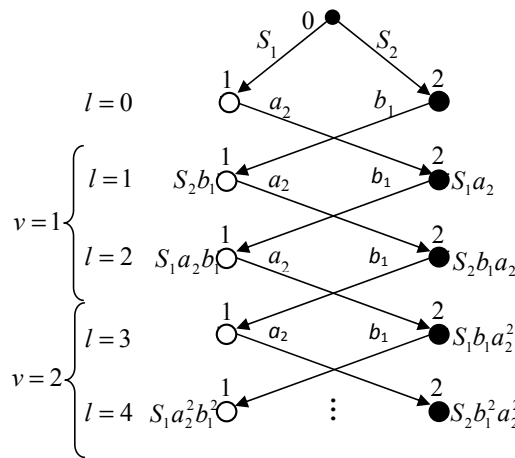


Рис. 9.

Отримані наближені формули значно простіші, чим (9). Замітимо, що вони отримані не аналітичним, а графоаналітичним перетворенням вихідної моделі процесу.

Введемо нову змінну  $v$ , що об'єднує пари суміжних значень  $l$ , як показано у табл. 1.

Таблиця 1. Співвіднесення змінних  $l$  та  $v$

$l$	1	2	3	4	5	6	7	8	...	$l-1$	$l$
$v$	1	2	3	4							$l/2$

В новій змінній ймовірності станів приймають вигляд

$$\left. \begin{aligned} S_1(v) &= (S_1 a_2 + S_2) b_1 q_0^{v-1} \\ S_2(v) &= (S_2 b_1 + S_1) a_2 q_0^{v-1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Тут при  $v > 0$  умова  $S_1(v) + S_2(v) = 1$  не дотримується, оскільки із станів 1, 2 на кроках  $v \geq 1$  можливі переходи у поглинаючі стани 3, 4 з умовними ймовірностями

$$a_3 = p_{13}/p_1, \quad a_4 = p_{14}/p_1, \quad b_4 = p_{24}/p_2. \quad (12)$$

Тому ймовірності завершення процесу на кроці  $v$  безпомилково (+), помилково (-) визначаються як

$$\left. \begin{aligned} P^+(v) &= (S_1 + S_2 b_1) q_0^{v-1} a_3 \\ P^-(v) &= (S_1 + S_2 b_1) q_0^{v-1} a_4 + (S_2 + S_1 a_2) q_0^{v-1} b_4 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Підсумовуючи (13) за  $v$  від 1 до  $\infty$ , отримаємо ймовірності безпомилкового ( $P_B$ ) та помилкового ( $P_H$ ) рішення задачі за критерієм "до першого успіху" у вигляді

$$\left. \begin{aligned} P_B &= (S_1 + S_2 b_1) a_3 / p_0 = 1 - P_H, \\ P_H &= [(S_1 + S_2 b_1) a_4 + (S_2 + S_1 a_2) b_4] / p_0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де  $p_0 = 1 - q_0$ .

Ці вирази приводяться до вигляду

$$\left. \begin{aligned} P_B &= \frac{(S_1 p_2 + S_2 p_{21}) p_{13}}{p_1 p_2 - p_{12} p_{21}} \\ P_H &= \frac{S_1 (p_{14} p_2 + p_{12} p_{24}) + S_2 (p_{21} p_{14} + p_{24} p_1)}{p_1 p_2 - p_{12} p_{21}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де  $p_j$  та  $p_i$  визначені в (5) через вихідні дані (4).

Аналітичні залежності (13), (15) для розрахунку показників безпомилковості рішення задач в контурі перервного ПФ систем отримані для бінарного стану об'єкта управління. Коректність підсумкових виразів (15) підтверджується здійсненістю нормувальної вимоги:  $P_H + P_B = 1$ .

### 5. Аналіз отриманих граничних виразів

Позначимо ймовірність безпомилкового виконання робіт в стані 1 через  $P$ , ймовірність відновлення правильного функціонування системи із стану 2 через  $B$  та застосуємо припущення про рівність ймовірностей правильних рішень при контролі  $K^1 = K^2 = K$ . Можливо показати, що ймовірність безпомилкового рішення задачі в цьому випадку буде

$$P_B = \frac{[S_1(1-K) + KB]PK}{PK[1-K(1-B)] + (1-P)(1-K)}. \quad (16)$$

Якщо відновлення безпомилкове ( $B = 1$ ), то маємо

$$P_B = \frac{[S_1(1-K) + K]PK}{PK + (1-P)(1-K)}. \quad (17)$$

При додатковому припущенні про початкове правильне функціонування системи (ОУ) приходимо до відомого [4] часткового випадку

$$P_B = \frac{PK}{PK + (1-P)(1-K)}. \quad (18)$$

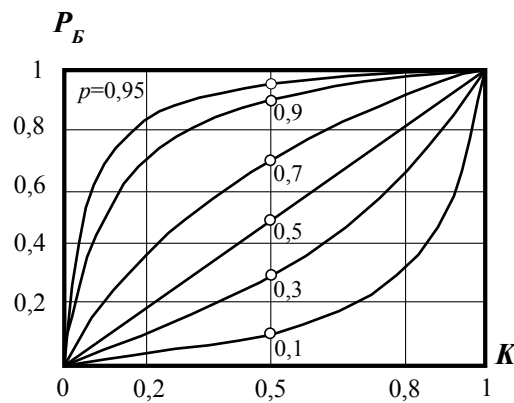


Рис. 10.

Тут в чисельнику – ймовірність сумісного безпомилкового виконання робочої й контрольної операцій, в знаменнику – ймовірність  $p$  завершення процесу на одному його кроці. Для цього випадку справедливі зростаючі залежності (рис. 10), де  $K = 0,5$  – характерна точка: зліва від неї  $P_B < P$ , тобто *безпомилковість рішення задачі з контуром зворотного зв'язку менше безпомилковості контрольованих дій*. Це спростовує відомий постулат, що іноді зустрічається, про універсальну корисність зворотного зв'язку в перервних процесах функціонування ОТС: **зворотній зв'язок може бути шкідливим** [10]. В розглянутому випадку позитивний ефект  $P_B > P$ , коли  $K > 0,5$  і тим більше, чим більш безпомилковий контроль (в ідеалі  $P_B = 1$ ) при  $K = 1$ ). Характерна зміна кривих від зігнутих при  $p \leq 0,5$  до випуклих при  $p > 0,5$ . Це відображає складність досягнення успіху при низькій кваліфікації виконавців, яких контролюють, а з іншого боку, – меншу значимість контролю виконавцями, які мають високу кваліфікацію.

При безпомилковому виконанні ( $P = 1$ ) контроль не потрібний: *висока кваліфікація не потребує контролю*. В цьому випадку із (16) слідує

$$P_B = \frac{S_1(1-K) + K^2B}{(1-K + KB)K} \leq P = 1.$$

Тільки при  $K = 1$   $P_B = P = 1$  що в згоді з дійсним досвідом. Разом з тим, без зворотного зв'язку безпомилковість визначається робочою операцією та не може бути вищою. Можливості підвищення безпомилковості формуванням контурів зворотного зв'язку в перервних ПФ поясними розрахунками.

**Приклад 1.** Нехай  $S_1 = K = B = 0,9$ ;  $P = 0,6$ . Ймовірність безпомилкового виконання задачі без 33в складає  $P_B = S_1P = 0,54$ . З введенням контуру безпомилковості по (16) отримаємо

$$P_B = \frac{(0,09 + 0,81)0,54}{0,54(1 - 0,09) + 0,04} = 0,374,$$

що на 37,4% вище.

**Завдання:** при  $S_1 = 1$ ;  $B = 0,9$ ;  $P = 0,6$  найти число  $n$  зворотних зв'язків, що охоплюють (рис. 11) контрольовані роботи з ймовірністю безпомилкового контролю  $K = 0,8$  для забезпечення ймовірності безпомилкового виконання задачі у цілому не менше 0,95.

**Рішення.** При  $S_1 = 1$  формула (16) для першого контуру перетворюється до виду

$$P_B(1) = \left\{ 1 + \frac{1-K}{K-K^2(1-B)} \left( \frac{1}{P} - 1 \right) \right\}^{-1}, \quad (19)$$

де  $P$  – ймовірність безпомилкового виконання робочої дії ( $P$ ).

Підстановкою вихідних даних отримаємо

$$P_B(1) = \left\{ 1 + \frac{0,2}{0,8(1-0,8 \cdot 0,1)} \cdot \frac{2}{3} \right\}^{-1} = \left( 1 + 0,272 \cdot \frac{2}{3} \right)^{-1} = 0,847.$$

Другий рівень контролю охоплює перший контур в якості робочих дій (пунктир на рис. 11). Підставляючи в (23) значення  $P = 0,847$ , знаходимо

$$P_B(2) = \left( 1 + 0,272 \cdot \frac{0,153}{0,847} \right)^{-1} = 0,953,$$

що більше чим вимагається. Отже  $n = 2$ , тобто достатньо двох рівнів контролю виконання робочої дії.

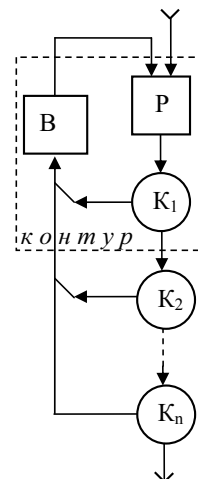


Рис. 11.

## 6. Методика розробки показника безпомилковості

1. Представлення процесу функціонування системи, що досліджується, у вигляді графу робіт з вершинами-роботами (розумовими або фізичними діями), що виконуються ергомічними або технічними елементами системи при прийнятті та/або виконанні рішень (приклад рис. 3).

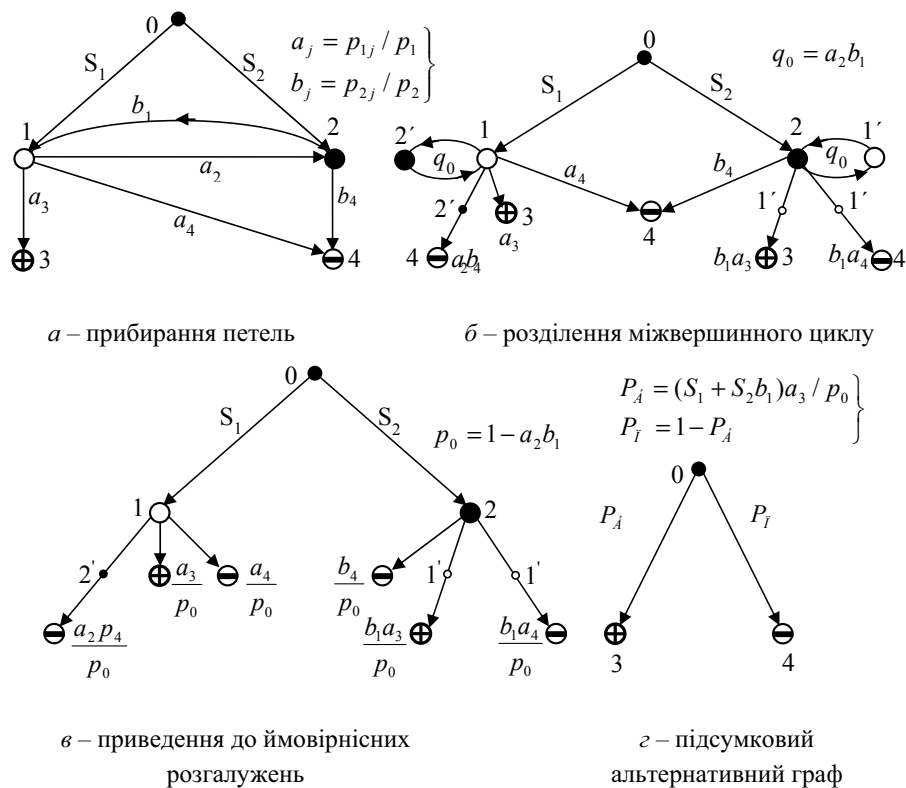


Рис. 12.

2. Визначення змісту та числа станів, що враховуються, об'єкту управління системи, задавання вихідних даних у вигляді матриць ймовірностей та початкового стану ОУ і матриць умовних ймовірностей його зміни типу (4).

3. Розробка детального графу подій з дугами-роботами, співвіднесеного одноразовому виконанню робіт, що моделюються, з одним проходженням по зворотному зв'язку (приклад рис. 4), вказування характеристик по дугам (стрілкам) графу з уточненням їх відповідності реальному процесу.

4. Виділення в цьому графу шляхів із вершин початкових станів у висячі, поглинаючі вершини з заміною кожного шляху дугою. Об'єднання тих із них, які ведуть в однакові вершини. Згортка шляхів супроводжується еквівалентними аналітичними перетвореннями вихідних характеристик. Суміщення висячих вершин з відповідними їм вершинами по станам – відображення петель при цих вершинах. (приклад рис. 5, формули (5)).

5. Прибирання петель при вершинах графу з нормуванням ймовірностей кожної дуги, що виходить із вершини  $i$ , на ймовірність  $p_i = 1 - q_i$  не входу в петлю (приклад рис. 12а).

6. Заміна міжвершинних контурів петлями при вершинах  $i$  з додатковими із них виходами в поглинаючі вершини  $k$  через суміжні вершини  $j$  (рис. 12б).

7. Повторення п.5 з прибиранням створених петель та перетворенням характеристик дуг із відповідних вершин в еквівалентні. Приведення графу подій до ймовірнісних розгалужень при вершинах без петель і контурів (рис. 12в).

8. Виявлення та об'єднання шляхів із початкової вершини в однотипні поглинаючі вершини. Приведення графу до альтернативного вигляду з врахованими поглинаючими вершинами з підсумковими ймовірностями безпомилкового / помилкового рішення задачі (рис. 12г, формули (15)).

### Висновки

1. Запропоновано категорійне визначення поняття “похибка”, що узагальнює помилку людини та збій техніки з розділенням відповідальності за **прийняте рішення** від відповідальності за **виконання** прийнятого рішення.

2. На відміну від [11], застосовані три методи виводу аналітичних залежностей для показника **безпомилковості** рішення задач ОТС:

- складанням та чисельним рішенням системи рекурентних рівнянь, співвідносних динаміці станів системи;
- отриманням формул з оцінки ймовірностей станів системи на довільний крок її функціонування;
- розробкою нових граничних виразів для оцінки безпомилковості рішення задач ОТС при великому числі звернень за зворотним зв'язком.

3. На прикладі типового контуру **перервного** управління отримані математичні моделі його безпомилковості, показані області підвищення правильності функціонування системи й області збільшення потоку небезпечних похибок.

4. Запропонована методика та математичні моделі доцільно застосовуватися при кількісному обґрунтуванні та апробації творчих рішень, що направлені на

підвищення ефективності ОТС з перервними контурами управління.

Наступні дослідження пропонується спрямувати на розробку математичних моделей та методики оцінки моментних час-ресурсних характеристик виконаних дій (робіт, операцій, заходів, задач).

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Вентцель Е.С. Исследование операций/ Е.С.Вентцель.М.: Советское радио, 1972, – 552 с.
2. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытания: справочник /А.Н. Адаменко, А.Т. Ашеро́в, И.Л. Бердников и др.; под. ред. А.И.Губинского и В.Г. Евграфова.–М.: Машиностроение, 1993.–528 с.
3. Чабаненко П.П. Становление и развитие аппарата функциональных сетей /П.П. Чабаненко //Збірник наукових праць. – Севастополь: Севаст. військ.-морськ. інст-т ім. П.С. Нахімова, 2003. – Вип. 2. – С. 160 – 168.
4. Гвоздик М.И. Оптимизация организационно-технических систем ВМФ. Методы, алгоритмы, программы /М.И.Гвоздик, В.Г.Евграфов, Е.Б.Цой. – Петродворец: ВВМУРЭ им. А.С. Попова, 1997. – 223 с.
5. Ашеро́в А.Т. Эргономика информационных технологий: уч.пос. /А.Т. Ашеро́в, С.А. Капленко, В.В. Чубук. – Харьков: ХГЭУ, 2000. – 224 с.
6. Барченко Н.Л. Ергономічне забезпечення діалогової людино-машинної взаємодії в модульних системах електронного навчання. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.01.04 / Харківський національний університет міського господарства.Харків. 2019.25 с.
7. Lavrov E. Development of models for the formalized description of modular e-learning system for the problems on providing ergonomic quality of human-computer interaction/E. Lavrov, N.Barchenko, N.Pasko, I.Borozenec//Eastern-European journal of enterprise technologies.-2017.-Vol.2/2(86),-P.4-13
8. Современные проблемы управления силами ВМФ: Теория и практика. Состояние и перспективы/ И.В.Соловьев и др.//Под ред. В.И.Куроедова.– С-Пб.: Политехника, 2006. – 432с.
9. Batalla J.M. Conception of ID layer performance at the network level for Internet of things, Springer J. Personal and Ubiquitous Computing, 18 (2)(2014) 465-480.
10. Чабаненко П.П., Розгонаєв С.М. Оцінювання ефективності бойової системи за принципами відповідності та зворотного зв'язку/ П.П.Чабаненко, С.М.Розгонаєв// Наука і оборона .– 2018. – №3. С.16-23.
11. Чабаненко П.П. Исследование безопасности и эффективности функционирования систем человек-техника эргосетями/П.П.Чабаненко – Севастополь.: АВМС им.П.С. Нахимова, 2012.–162 с.

Стаття надійшла до редколегії 01.10.2018 р.

**Рецензент Г.С. Залевський**, д-р техн. наук, с.н.с.  
(Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків)

**Рецензент О. О. Расстригин**, д-р техн. наук, с.н.с.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)  
<https://orcid.org/0000-0002-1482-6111>